

Kältemittel-Hubkolbenverdichter

Gedanken zu Forschung und Konstruktion

Ulrich Adolph, Leipzig

Die gegenwärtige Tendenz im Bereich der Forschung und Entwicklung auf vielen Gebieten der Technik ist auf manchen gern durchforschten Feldern durch einen großen Vorsprung der Theorie gegenüber der Praxis gekennzeichnet. Dabei scheint es aber so zu sein, daß dieser Vorsprung gar keine Chance hat, in seiner ganzen Fülle jemals nutzbar zu werden, weil die Anforderungen des toleranzbehafteten Maschinenbaues auf ganz anderen Gebieten liegen.

Die Hubkolbenverdichter als bedeutende Maschinen der Kältetechnik bieten für diese Einschätzung manchen Anhaltspunkt. Nachdem der Autor vor einem Jahr für die Praxisorientierung seiner Entwicklungsarbeiten die DKV-Münze verliehen bekam, will er mit diesem Beitrag versuchen, für das Fachgebiet eine Orientierung zu geben. Er ist sich im klaren darüber, auf Widerspruch zu stoßen. Er ist andererseits aber auch überzeugt, daß unbequeme Wahrheiten nicht gern gehört oder gelesen werden. Das gilt für milliardenschwere Forschungen zur Theorie des Urknalls und der Schwarzen Löcher ebenso wie für die um einige Zehnerpotenzen leichtere Verdichtersforschung.

Einleitung

Hubkolbenverdichter haben einen hohen Entwicklungsstand erreicht, dessen grundlegende Lösungen auf eine lange Entwicklungsgeschichte zurückgehen. Die verschiedensten Bauarten von Verdichtern sind ausgereift und die meisten auf

dem Markt befindlichen Produkte zeichnen sich durch hohe Zuverlässigkeit, guten Gütegrad und marktfähige Preise aus.

Trotzdem werden in allen Forschungs- und Entwicklungsstellen für Kältemittelverdichter eine Vielzahl von Arbeiten durchgeführt, deren Inhalt von grundlegenden Forschungsarbeiten bis zu anpassenden Weiterentwicklungsarbeiten reicht.

Bei einer Gesamtschätzung der Situation muß jedoch festgestellt werden, daß einerseits viele neue Ergebnisse auf den Arbeitsgebieten präsentiert werden, die der mathematischen und experimentellen Forschung verhältnismäßig leicht zugänglich sind, aber wenig zu wirklich neuartigen Lösungen beitragen, während andererseits auf den schwieriger zugänglichen, aber praxisrelevanten Gebieten, wie z. B. Schall, Reibung oder Verschleiß, kaum allgemeingültige Lösungen für dringend anstehende Fragen bekannt werden. Die Purdue-Verdichterkonferenz 1998 ist dafür ein deutliches Beispiel [1]. Viele Vorträge hatten außerordentlich spezielle Lösungen zum Inhalt, die einerseits vor allem nur für denjenigen Verdichter von Bedeutung sind, der unmittelbar Forschungsgegenstand war, die andererseits aber auch als ein hervorragendes Forschungstraining für den oder die Forscher selbst betrachtet werden können. Für die interessierten Zuhörer jedoch, von denen ja viele selbst Verdichtersentwickler waren, stellte sich nur in Ausnahmefällen ein Nutzeffekt heraus.

Dieser Trend ist seit längerem zu beobachten [2]. Ein Verdichterkolloquium an der TU Dresden im vorigen Jahr [3], bei der so eine Tendenz auch festzustellen war, regte mich zum Schreiben dieser Zeilen an.

zum Autor

Dr.-Ing. Ulrich Adolph,
Entwicklungs-
berater Kälte-
und Klima-
technik, Leipzig



Es sollen Orientierungen für zukünftige Arbeiten zum Ausdruck kommen, deren Ergebnisse besser als bisher den Bedürfnissen der Praxis gerecht werden.

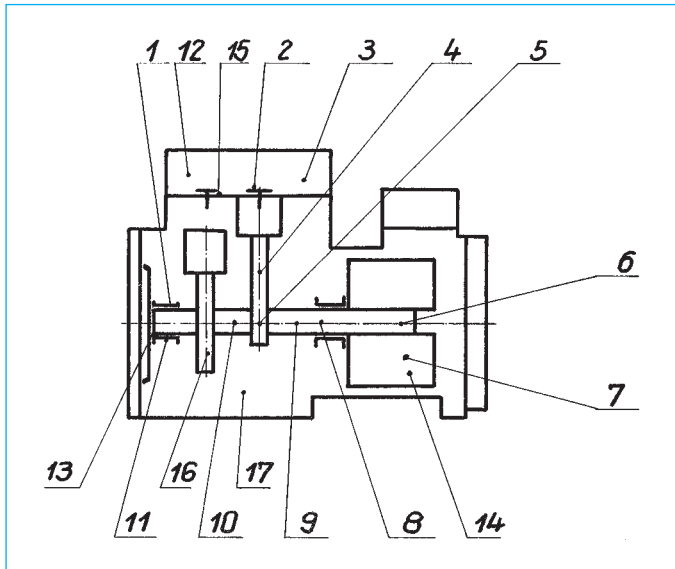
Ausgangssituation

Ein Vortrag von Ninkovic auf dem Verdichterkolloquium 1997 [4] gipfelte darin, daß sich der Vortragende einen Supercomputer für die weitere Verdichtersentwicklung wünschte, um eine komplette Verdichtersimulation durchführen zu können. Ist das wirklich notwendig?

Ja und nein! Dazu diese Thesen:

- Ja, wenn man wirklich bis zum letzten Bruchteil von Temperatur, Druck, Leistung und Volumenstrom vordringen möchte. Aber ist das überhaupt möglich und nötig?
- Nein, wenn man effektive und langlebige Maschinen entwickeln will. Diese Aufgabenstellung entspricht den praktischen Bedürfnissen und ihre Lösung ist ohne Supercomputer möglich.
- Man kann einen Verdichter bei weitem nicht so exakt fertigen, wie man ihn schon heute berechnen kann. Überall gibt es auch bei der genauesten Fertigung Toleranzen. Das trifft auf innere Abdichtungen, Lagerspiele und Reibstellen ebenso zu wie auf Antriebsleistungen und Förderströme.

Abb. 1 Verdichter mit Problemzonen für Forschung und Entwicklung:
 Triebwerksdynamik und Lagerung;
 Schmierung, Reibung und Verschleiß;
 Fördermedium (Realgasbedingungen) und Druckbeanspruchung;
 Innere und äußere Dichtheit;
 Arbeitsventilverhalten;
 Bewegungsverhältnisse, Arbeitsverluste, Lebensdauer
 Schall und Schwingungen;
 Antrieb u. a. m.



Warum aber meint Dr. Ninkovic, den Supercomputer zu brauchen?

Die Zusammenhänge im Verdichter sind tatsächlich sehr komplex und vielseitig. Kolbenverdichter sind maschinenbauliche Musterbeispiele dafür, wie man von der Triebwerksdynamik bis zur Zylinderthermodynamik dankbare Forschungsthemen formulieren und miteinander verknüpfen kann.

Eine Besonderheit bei den Berechnungen von Ninkovic ist die Leckströmung über die Labyrinthdichtung des Kolbens. Die Überlagerung der Berechnung der Temperaturen und Leistungen mit der Leckstromberechnung beeinflusst die Ergebnisse wesentlich und erhöht stark den Aufwand.

Bei ölgeschmierten Niederdruckverdichtern mit Kolbenringen, wozu die Kältemittelverdichter gehören, kann die Leckströmung dagegen im allgemeinen vernachlässigt werden. Auch bei Labyrinthverdichtern lassen sich die wesentlichen Effekte schon ohne komplexe Simulation beherrschen.

Zwischen diesen beiden Extremen liegt ein weites Feld für vernünftige Arbeiten auf dem Gebiet der inneren Dichtheit. In der Kältetechnik spielt die innere Dichtheit bei den Drehkolbenverdichtern (Schraubenverdichter, Scrollverdichter) eine wichtige Rolle, um Effektivität und Einsatzgrenzen optimal zu gestalten. Aber Verbesserungen werden dabei nur in begrenztem Umfang durch neue Berechnungsmethoden oder durch experimen-

telles Untersuchungen des Einflusses der Leckströmung erreicht, vielmehr liegt die wesentliche Quelle der Verbesserungen auf dem Gebiet der Fertigungstechnik, nämlich der Fähigkeit, engere Spalte ohne die Gefahr des Fressens der Rotoren zu fertigen. Der Verdichterentwickler selbst braucht dann nur noch das Ergebnis im Leistungstest festzustellen. Das ist aber keine Arbeit, die den Namen Forschung verdient.

Ähnliches gilt für mancherlei andere Faktoren, die Einfluß auf die Verdichterefunktion haben.

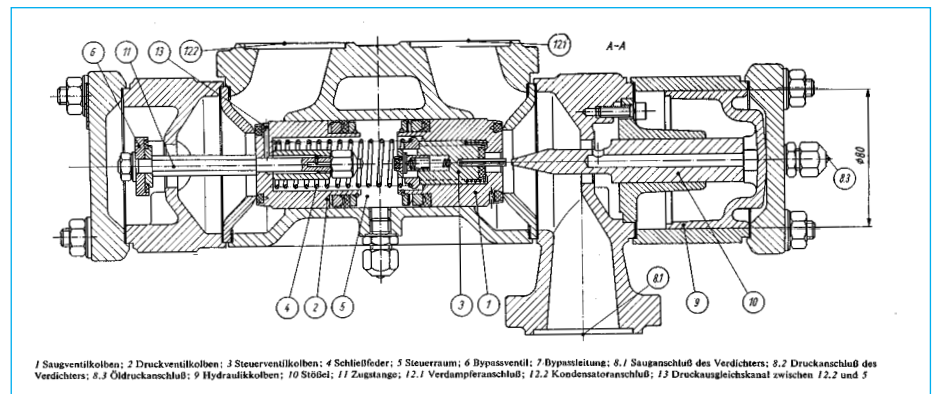


Abb. 2 Automatisches Absperrventil für Kältemittelverdichter in mobilen Kälteanlagen

Im Abb. 1 ist dargestellt, welche Problemzonen an den Kältemittelverdichtern der Forschung unterliegen und immer wieder Gegenstand von Veröffentlichungen sind.

Hier gebe ich zu bedenken:
Muß alles verknüpft simuliert werden oder tut es nicht auch das Superpositionsprinzip auf der Grundlage der Berechnung der Einzelvorgänge? Ich denke, in den meisten Fällen genügt die Kennt-

nis der Einzelvorgänge und die Beurteilung ihrer gegenseitigen Beeinflussung in einer zweiten Iterationsstufe.

Zu Beginn meiner Berufspraxis in der Kältetechnik gab es ein für mich lehrreiches Beispiel für die Bedeutung der Relationen von Wissenschaft und Praxis:

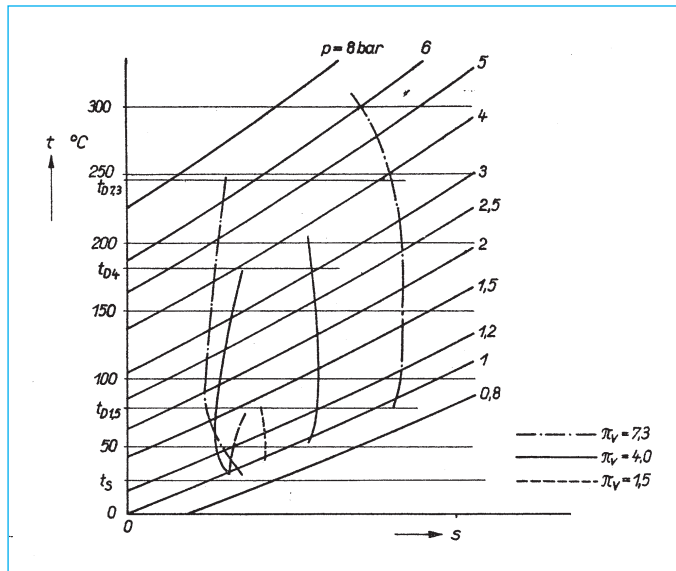
In einem Anwendungsfall wurden 100 % Verdichterausfall durch Lagerfresser festgestellt! Allen Verdichterentwicklern und vielen Anwendern ist dieses Thema ein Alptraum! Zuerst muß in so einem Falle als Ursache die Ölverdünnung durch gelöstes Kältemittel betrachtet werden.

Wissenschaftler sollten damals die Lösung finden. Sie arbeiteten an einer genaueren Lagerberechnung und leiteten Bedingungen für eine exaktere Fertigung daraus ab – ohne Erfolg. Als wesentliche Ursache stellte sich schließlich heraus, daß in Stillstandszeiten der Kältemaschine das Öl zu stark verdünnt wurde, weil in der Transportkälteanlage, bei der die Schäden auftraten, die üblichen Schutzmaßnahmen Ölheizung oder Abpumpschaltung versagten, da während der Abstellzeiten der Waggons keine elektrische Energie am Kältesatz anlag.

Praktiker entwickelten ein automatisch wirkendes Absperrventil ohne Hilfsenergie, wodurch das Eindringen von Kältemittel in das Öl während der Standzeit verhindert wurde, s. Abb. 2 – das war die entscheidende Lösung [5]. Aber bis heute spielt dieses Problem der Ölverdünnung immer wieder eine Rolle, wenn Verdichter

übermäßig durch Lagerfresser ausfallen, und allen praktischen Erfahrungen nach Trotz wird seitens des Verdichteranwenders dieser Ursache meist zu wenig Bedeutung beigemessen. Das Ventil verschwand wegen der damit verbundenen Kostensteigerung wieder vom Markt und

Abb. 3 Gemessene Innentemperaturverläufe von Eirich



es wird in relevanten Schadensfällen, die es bis in die Gegenwart gibt, weiterhin herumprobieren. Andererseits sind diese Art von Schadensursachen im Laufe der Zeit deutlich reduziert worden, weil vor allem geringere Kältemittelfüllmengen der Anlagen und Lösungen für die schnelle Kältemittelaustreibung nach dem Verdichterstart die Situation entschärft haben.

Die Lagerberechnung sowie deren Werkstoffauswahl und Fertigungsgüte, die für dieses Schadensbild zunächst relevant erscheinen, haben heute einen Entwicklungsstand erreicht, daß man auf diesem Feld kaum noch die Ursache für diese Art von Ausfällen finden bzw. Verbesserungen erwarten kann. Für viele andere Gebiete trifft das ebenfalls zu. Daß heute Arbeitsventile z. B. eine nahezu unbegrenzte Lebensdauer haben, ist nur zum geringen Teil auf deren bessere theoretische Durchdringung zurückzuführen, obwohl die Anzahl der wissenschaftlichen Arbeiten auch auf diesem Gebiet unerschöpflich ist. Die Hauptleistung wurde von den Werkstoffentwicklern und den Fertigungstechnikern erbracht.

Erfahrungen und Auffassungen

Für Verdichterentwickler stellt sich die Frage:

Welchen Anteil haben mathematische und physikalische Vertiefungen bei Kältemittelverdichtern am technischen Fortschritt tatsächlich?

Kleinert [3] stellte 10 Regeln für Auslegung und Konstruktion von Trockenlaufverdichtern auf. Diese ermöglichen die Optimierung auf der Basis von bekannten Einzelergebnissen und Erfahrungen, aber keine dieser Regeln bedarf zu ihrer Umsetzung eines Computers oder gar eines Supercomputers.

Hergt und Zilling [6] äußerten sich einmal zur Anwendung von Erfahrungswerten und physikalisch verbesserter Berechnungsmethoden bei Pumpen, was vollständig auch für Verdichter so zutrifft: „Auch physikalisch besser aufbereitete Methoden kommen nicht ohne Beiwerte (Korrekturfaktoren, Erfahrungswerte, Moggelfaktoren, d. V.) aus, deren Bestimmung wiederum einer langen Erfahrungsperiode bedarf.“

Stepanoff sagte einmal zur gleichen Thematik: „Wenn wir bei Ingersoll Rand eine neue Pumpe entwickeln, schauen wir zunächst auf das neueste Modell des Wettbewerbers Westinghouse und nutzen deren Erfahrungen“. Und auf die Frage nach dem Nutzen dreidimensionaler Strömungsberechnungen antwortete er: „Es ist den Forschern schon gelungen, die praktisch erreichten Leistungen und Wirkungsgrade rechnerisch nachzuvollziehen.“

Baade [7] bringt die Situation bildlich als Verhältnis von Kunst und Wissenschaft zum Ausdruck: „Jede gute Technik ist die Kunst der Nutzung der Wissenschaft . . . Der Wert einer Technik ist nicht an der Proportionalität von Wissenschaft und Kunst abzulesen, sondern hängt vielmehr von der richtigen Mischung und der richtigen Art ab, so wie ein Motor die richtige Mischung von Kraftstoff und Luft braucht. Selbstverständlich erfordert der Motor auch die richtige Art von Kraftstoff, . . . so

wie wir in unseren Autos eben keinen Raketenantrieb verwenden können.“

Bei der Verdichterentwicklung treffen diese Erfahrungen und Ratschläge weitgehend zu.

Gute Verdichter gibt es schon aus der computerlosen Zeit, in der auch Drücke und Temperaturen noch konventionell gemessen wurden. Die meisten Zusammenhänge wurden quasistatisch mit Erfahrungswerten berechnet:

Für den Förderstrom und den Ausnutzungsgrad arbeitete man mit einfachen Gleichungen, z. B.

$$\dot{V} = \lambda_h \cdot \dot{V}_r$$

d. h. der Förderstrom \dot{V} berechnet sich aus Produkt von Ausnutzungsgrad (auch Liefergrad genannt) λ_h und Hubraumstrom (auch geometrischer Förderstrom genannt) \dot{V}_r

$$\lambda_h = \lambda_i \cdot \lambda_t \cdot \lambda_d \cdot \lambda_p$$

d. h. der Ausnutzungsgrad berechnet sich als Produkt der Teile indizierter Liefergrad, Aufheizungsgrad, Dichtheitsgrad und Druckverlustgrad. Für diese Faktoren gibt es entweder Erfahrungswerte, wie z. B. für den Aufheizungsgrad, s. Abb. 4, oder einfache Berechnungsgleichungen, wie z. B. für den indizierten Liefergrad, oder die Kombination beider Methoden.

Ähnlich verhält es sich mit der Leistungsberechnung auf der Basis der Gütegrade. Mit einfachen Gleichungen kann man die Aufgaben bewältigen:

$$P = \eta_{ges} \cdot P_{th}$$

$$\eta_{ges} = \eta_i \cdot \eta_d \cdot \eta_m$$

$$\eta_i = \eta_{i str} \cdot \eta_{i t}$$

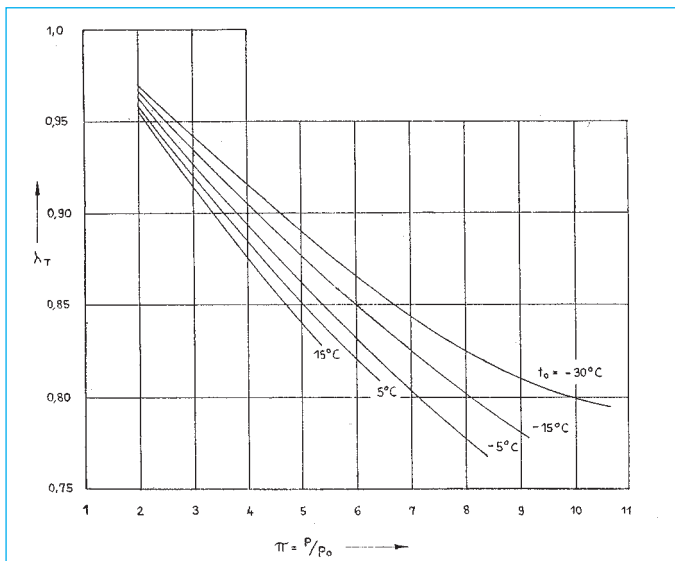
Ohne näher auf die Zusammenhänge einzugehen, stelle ich die These auf, daß man mit diesen Gleichungen und den dazugehörigen Erfahrungswerten Verdichter gut auslegen kann.

Insbesondere die thermischen Verhältnisse der Verdichter haben die Forscher aber nicht ruhen lassen, beeinflussen diese Verhältnisse doch den Ausnutzungsgrad ebenso wie den Gütegrad. Eine der ersten Arbeiten dazu ist die von Eirich [8], nachdem vorher bereits an Dieselmotoren solche Forschungen durchgeführt worden waren. Die von ihm gemessenen Zylinder-temperaturverläufe zeigt an einem Beispiel Abb. 3. Niemand hat später Eirichs Forschungen wirklich benötigt, um einen besseren Verdichter zu entwickeln!

Seit Eirich wurde immer wieder versucht, die Innenvorgänge analytisch zu erfassen. Ein großer Aufwand an Meß- und Rechentechnik wurde in die Forschung gesteckt. Bis heute gibt es keine allgemeingültige Lösung. Jeweils gefundene Ergebnisse blieben auf den angepaßten Anwendungsfall beschränkt. Die Literaturliste der wissenschaftlichen Arbeiten zu dieser Thematik würde schon Seiten füllen. Röttger [9], hat durch Rückrechnung aus realen Verdichtern versucht, die Innenvorgänge zu simulieren. Bis in die Gegenwart schließen sich andere Forscher an, obwohl von Röttger bis Ninkovic die gleiche Erkenntnis immer wieder zu lesen ist:

„Der Wärmeübergang zwischen Zylinderwand und Förderstoff hat keinen bemerkenswerten Einfluß auf den Leistungsbedarf“

Abb. 4 Aufheizungs-wertediagramm von Haustein



Ein Einfluß auf den angesaugten Förderstrom dagegen ist offenbar gegeben, aber er ist äußerst kompliziert durch Überlagerung mit dem Wärmeübergang vom Verdichtungsraum bis zum Saugstutzen, vom Zylinderkopf zum Verdichtungsraum und mit den einzeln nur schwer feststellbaren inneren Leckströmen. Am Ende beschreibt eben der Aufheizungsgrad dieses Phänomen am einfachsten. Es wäre dankenswert, diesen wichtigen Beiwert durch sorgsames Zusammentragen von Meßergebnissen weiter zu präzisieren.

Kann man die eindimensionale quasistatische Berechnung auf das für praktische Zwecke notwendige Maß verbessern, oder reicht der Kenntnisstand oft schon aus? Bringt uns dieser Weg eventuell schneller zu brauchbareren Ergebnissen, falls wir überhaupt welche benötigen? Ich denke, ja!

Wie bereitwillig solche Verfahren von der Praxis aufgenommen werden, zeigt die mittlerweile veraltete Ausnutzungsgradberechnung für Kältemittelverdichter von Linge, abgeleitet aus Erfahrungswerten von langsamlaufenden Ammoniak-Kältemittelverdichtern. Sie findet sich – kritiklos verallgemeinert – in Lehrbüchern bis in die Gegenwart, obwohl die damit ermittelten Werte für neuzeitliche Verdichter schon lange nicht mehr zutreffen. Für neuere Halbhermetikverdichter liegt dazu die richtungweisende Arbeit von Haustein vor [10].

Durch die Auswertung von realen halbhermetischen Kältemittelkolbenverdichtern und Einordnung der Ergebnisse in physikalisch unterlegte Zusammenhänge, sowie durch die Präzisierung der Erfahrungswerte bei den unvermeidlichen

Streuungen, konnten brauchbare Richtwerte für den Aufheizungsgrad ermittelt werden, s. Abb. 4. Auch andere brauchbare Kennwerte sind bei Haustein zu finden.

Die NET-Methode zur Ermittlung des Temperaturfeldes von Verdichtern (Simulationsmethode der 70er und 80er Jahre) auf der physikalischen Grundlage möglichst vieler Wärmesenken und Wärmequellen brachte einen Irrgarten von Ergebnissen für die Verdichterberechnung, die praktisch ohne jede Bedeutung bleiben mußten. So mancher Autor hat damit nicht wenige Seiten unserer Fachliteratur gefüllt.

Insgesamt ergibt sich folgende Gesamtsicht auf die Problematik:

Situation: Eine hervorragende Meß- und Rechentechnik ist verfügbar, mit Genauigkeiten um viele Größenordnungen höher, als eine Maschine so genau gebaut werden kann.

Versuchung: Die Steigerung der Genauigkeiten bei der Untersuchung und Berechnung für die verbesserte Auslegung von Bauteilen, Baugruppen und Maschinen ist anscheinend eine nie versiegende Forschungsthematik.

Das ist das Trainingsfeld vieler junger Forscher zum immer tieferen Eindringen in die Einzelheiten des Verdichters. Ein anschauliches Beispiel dafür sind die Vorträge auf den Purdue-Verdichterkonferenzen. Jede neue meßtechnische oder mathematische Möglichkeit ruft neue Aktivitäten hervor. Das steht in keinem Verhältnis zu den Möglichkeiten der Fertigungsgenauigkeit einer Maschine, wie es z. B. der Kolbenverdichter ist.

● **Schlußfolgerung:** Der Maschinenbauingenieur muß nicht in physikalischen Genauigkeits-Größenordnungen denken und arbeiten.

Wenn es schon schwer zu verstehen ist, warum die Physiker heutzutage, den Bedürfnissen der Gegenwart weit voraus, z. B. einen Teilchenbeschleuniger betreiben und sich über einen Elementarteilchentreffer je Tag freuen oder die soundsovielte Galaxis entdecken und abenteuerlich interpretieren, so darf das kein Maßstab für die Maschinenbauer werden!

Wirklichkeit: Die Verdichter werden in der Praxis der Lieferanten und Anwender nicht genau auf den Bedarf entwickelt, sondern vernünftigt abgestuft:

- in Kolbenhubstaffelungen
- in Zylinderdurchmesserstaffelungen
- in Motorgrößenstaffelungen
- mit Toleranzen bei der Herstellung der Bauteile

Auf die zehntelmillimeter genaue Vorbestimmung der Hauptabmessungen kommt es also nicht an, sondern auf das beste Verhältnis von Antriebsleistung zu Förderstrom. Dazu sind Verlustanalysen notwendig, bei der man die Einzelverluste getrennt voneinander untersuchen kann und das vernünftigerweise auch tut, z. B. Leckverluste, Strömungswiderstände, Reibungsverluste. Sie beeinflussen sich gegenseitig so wenig, daß man ihre Verknüpfung meist unberücksichtigt lassen kann. Diese drei Bereiche sind klassische Beispiele für die erfolgreiche Anwendung von erfahrungsbasierten Beiwerten für die Berechnung, weil eben die Vielzahl verschiedener konstruktiver Lösungen eine geschlossene mathematische Behandlung nicht zuläßt und nicht erforderlich macht.

Beispiele für wenig Nutzeffekt erbringende Forschungsarbeiten

Simulation des Gaszustandsverlaufes im Zylinder während der Verdichtung

Abgesehen davon, daß bei den neuzeitlichen schnellaufenden Verdichtern der Wärmeübergang von und zur Zylinderwand vernachlässigt werden kann, bringt dessen Einbeziehung in die Simulationsberechnung keinen Fortschritt. Die außerhalb des Zylinders stattfindenden Wärmeübergangsprozesse sind bemerkenswerter, müßten einbezogen werden, sind aber über den Aufheizungsgrad ausreichend berücksichtigt.

Schmierspaltberechnung für hydrodynamisch geschmierte Lager

Der heutige Erkenntnisstand für die Berechnung zylindrischer Lager mit endlicher Breite ermöglicht dem Konstrukteur ausreichende Rückschlüsse auf die Gestaltung der Ölversorgung des Lagers und einen Vergleich verschiedener Lösungsvarianten hinsichtlich kleinstem Schmierspalt und dessen Ausdehnung in Umfangsrichtung. Eine Verfeinerung der Berechnung bezüglich der Einbeziehung der Form- und Lageabweichungen, Rauigkeiten und Betriebsverformungen führte zu keinen brauchbaren allgemeingültigen Ergebnissen und ist auch wegen der im konkreten Falle nicht bekannten Toleranzwerte wenig sinnvoll. Dagegen wäre es aber notwendig, die Beurteilungskriterien für die Berechnungsergebnisse an Hand von Lebensdauererfahrungen zu verbessern.

Berechnung der Strömungsform bei der Ventildurchströmung

Die meßtechnische Bestimmung der Durchflußzahlen und ihre Systematisierung in Abhängigkeit von den konstruktiven Parametern der Ventile hat einen guten Stand erreicht, sollte systematisch vervollständigt werden und ermöglicht die Berechnung der Arbeitsverluste und in Zusammenhang mit den Berechnungsverfahren für die Strömungskräfte, z. B. von Bredeisen auch die Bestimmung der erforderlichen Ventildruckkraft.

Berechnung des Bewegungsverlaufes der Ventilplatten

Es ist inzwischen ein solcher Kenntnisstand erreicht, daß man die Ventildruckkräfte für einen optimalen Bewegungsablauf der Ventilplatte richtig dimensionieren kann, so daß eine Berechnung des Bewegungsverlaufes nur in Ausnahmefällen

erforderlich sein wird. Diese Aufgabe kann mit dem bekannten Wissensstand erledigt werden. Auch die Einsatzbereiche der Ventile bei wechselnden Betriebsbedingungen können gut abgeschätzt werden.

Berechnung der Spaltverluste an Kolbenringen

Die Leckverlustberechnung nach Bartmann darf als ausreichender aktueller Wissensstand betrachtet werden. Bei ölge-

Gütegrades und des Ausnutzungsgrades, wie oben beschrieben zu verstehen.

Vorausbestimmung von Lebensdauer- und Verschleißwerten

Diese Aufgabe ist weitgehend ungelöst. Es handelt sich dabei um schwierige Forschungsarbeiten, die langwierig sind und schlecht reproduzierbare Ergebnisse liefern. Das Ziel dieser Arbeiten muß die möglichst genaue Vorausbestimmung der Betriebsgrenzwerte in Abhängigkeit von

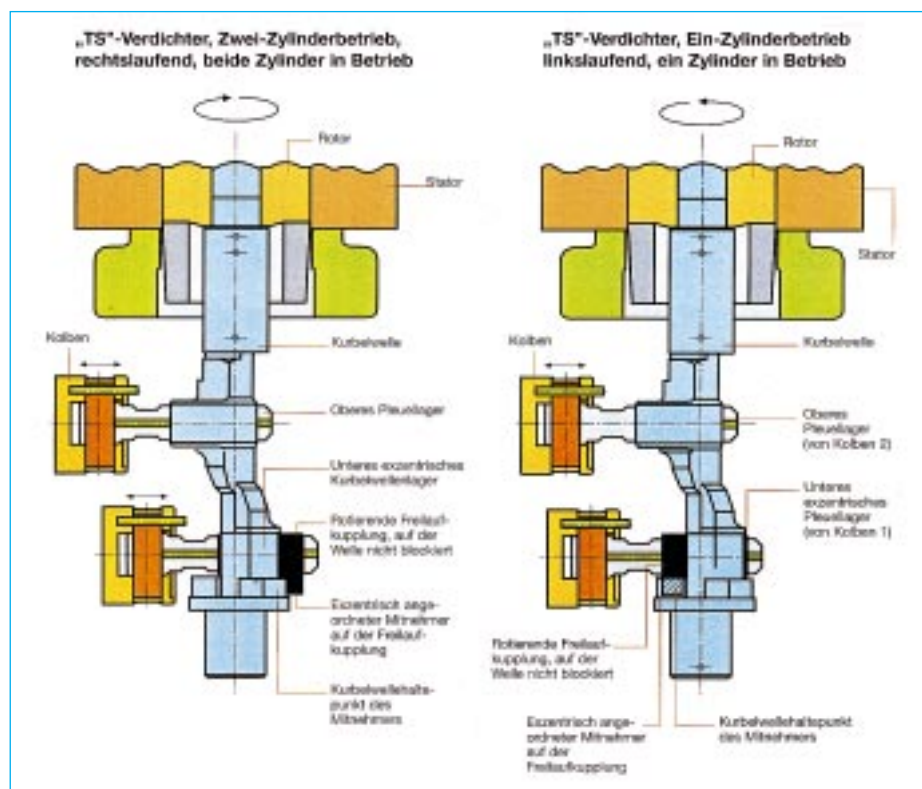


Abb. 5 Prinzip des Twin-Single-Verdichters von Bristol

schmierten Verdichtern sorgt die Anzahl der Kolbenringe aus, die man nach den bekannten Erfahrungsformeln bestimmt, um die Leckverluste in vernachlässigbarer Größe zu halten. Für Trockenlaufverdichter trifft dies nicht zu. Für diesen Anwendungsfall liegen aber sowohl für Labyrinth- als auch für Kolbenringverdichter ausreichende Kenntnisse zu deren Bestimmung vor. Eine genauere Berechnung würde die Realität nicht genauer treffen können.

Notwendigkeiten für Forschungsarbeiten mit Nutzeffekt bei der Kolbenverdichtererentwicklung

Bestimmung von Förderstrom, Zwischen- und Antriebsleistung

Darunter ist die weitere Verbesserung der Einzelwerte für die Bestimmung des

den Betriebsbedingungen sein, vor allem zum Zwecke der vorbeugenden Instandhaltung.

Vorausbestimmung der Geräuschwerte und der Dämpfungsmöglichkeiten

Zu diesen Problemen gibt es eine Vielzahl von Richtlinien und Erfahrungsmaßnahmen, im Einzelfall steht der Entwickler aber immer wieder hilflos vor dem Schallproblem seines Verdichters oder noch öfter seiner Verdichteranlage.

Werkstoffoptimierung

Auf diesem Gebiet muß zielgerichtet zum Zwecke der Kostenoptimierung, der Lösung der Lebensdauer- und Geräuschpro-

bleme, der Massereduzierung, der besseren Beherrschung der Schwingungsfragen und der Steigerung der technologischen Sicherheit im Fertigungsprozeß gearbeitet werden.

Die Forschungsarbeiten zur Lösung dieser offenen Fragen sind wenig attraktiv, vor allem für junge Wissenschaftler mit dem Ziel, akademische Grade und wissenschaftliche Anerkennung zu erringen, da kurzfristige Erfolge mit diesen schwierigen Themen nicht zu erreichen sind. Sie sind deshalb für Dissertationsthemen oder Drittmittelarbeiten nicht begehrt. Aber sie sollten angegangen werden, denn (frei nach Hartmann)

*wir werden immer das bleiben,
was wir heute sind,
wenn wir immer nur das tun,
was wir schon können.*

Und so ist es erfreulich, wenn wir in diesem Jahr die Dissertation von Jürgen Süß [11] zur Entwicklung von CO₂-Verdichtern begrüßen konnten. Sie ist ein Beispiel dafür, wie aus einer wissenschaftlichen Arbeit wichtige konstruktive Hinweise entspringen können und läßt die obige

Einschätzung ein bißchen milder erscheinen.

In ähnlicher Weise verdient die neue konstruktive Lösung von Bristol mit der Bezeichnung Twin-Single-Technologie eine Hervorhebung, da mit diesem beneidenswerten Einfall eine äußerst effektive Leistungsstaffelung erreicht wird, s. Abb. 5. Natürlich mußten bei der Entwicklung dieser Lösung die Lager- und Schwingungstechniker Pate stehen, aber der innovative Anstoß ist konstruktiver Natur.

Es freut den Autor auch zu sehen, daß mit jeweils ca. 25 Jahren Differenz trotz weit fortgeschrittener Forschung bewährte Konstruktionslösungen wieder auftauchen, die der Zeit zum Opfer gefallen waren, nämlich die mit „varicool“ bezeichnete Baukastenlösung eines Herstellers und die neu eingeführte halbhermetische Grundkonzeption mit abnehmbaren Motorgehäuse eines anderen Herstellers.

Übrigens: Diese Ausführungen sollen kein Feldzug gegen den Computer in der Forschung oder gar gegen die Forschung sein! Sie sollen ein Bemühen um sinnvolle Forschungsthemen und effektive Nutzung

der Forschungswerkzeuge sein, wozu der Computer als unverzichtbares Instrument gehört. □

Literatur

- [1] Proceedings der Purdue Compressor Technology Conference, 1998.
- [2] Adolph, U. Ingenieuraufgaben und Lösungswege bei der Entwicklung von Hubkolben-Kältemittelverdichtern Maschinenbautechnik, Berlin 33 (1984) 3, S. 131-133.
- [3] Kolloquium Entwicklung und Betrieb von Kolbenverdichtern, 1997, Technische Universität Dresden.
- [4] Ninkovic, D.: Einfluß der Teilmodelle auf die Genauigkeit von Zylinderprozeß-Simulation, in [3], S. 1-10.
- [5] Adolph, U. u. a.: Konstruktive Möglichkeiten zur Steigerung der Zuverlässigkeit von Hubkolbenverdichtern in automatischen Freonanlagen, DIE KÄLTE, 1976.
- [6] Hergt, P. u. H. Zilling: Vorwort zum Buch „Pumpen, Ventilatoren und Kompressoren“ von Kováts und Desmur, Karlsruhe, 1968.
- [7] Baade, P. K.: Reduction of Machinery Noise Proceedings of Purdue Compressor Technology Conference, 1974.
- [8] Eirich, A.: Untersuchung eines einstufigen Kolbenverdichters mit Bestimmung der Wärmeübergangszahl Diss. TH Zürich, 1959.
- [9] Röttger, W.: Digitale Simulation von Kältekompressoren unter Verwendung realer Zustandsgleichungen, Diss. TU Hannover, 1975.
- [10] Haustein, G.: Beitrag zur optimalen Auslegung von halbhermetischen Kältemittel-Hubkolbenverdichtern, Diss. TU Dresden, 1990.
- [11] Süß, J.: Untersuchungen zur Konstruktion moderner Verdichter für Kohlendioxid als Kältemittel, Diss. Universität Hannover, 1998 DKV-Forschungsbericht Nr. 59.